



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

RECYKLACE PLASTŮ PRO POTŘEBY 3D TISKU

RECYCLING PLASTICS FOR 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN HELLEBRAND

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Hellebrand

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku

v anglickém jazyce:

Recycling plastics for 3D printing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor problematiky 3D tisku. Materiálové charakteristiky používaných plastů. Posouzení vhodnosti použití pro 3D tisk jednotlivých plastů. Návrh a posouzení možností recyklace pro tisku.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky 3d tisku s orientací na FDM
- rešerše problematiky materiálů pro 3d tisk
- základní charakteristiky materiálů pro 3d tisk
- plniva v materiálech pro 3d tisk
- možnosti recyklace
- zhodnocení a doporučení autora

Seznam odborné literatury:


1. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
2. CHOI, S.H. a S. SAMAVEDAM. Modelling and otimisation of Rapid Prototyping. Computers in industry. č. 47, s. 39-53. ISSN 166-3615.
3. NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.
4. YAN, Xue a P GU. A review of rapid prototyping technologies and systems. Computer-Aided Design. roč. 28, č. 4, s. 307-318. ISSN 0010-4485.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013




prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Cílem této práce je rozbor základních metod technologie Rapid Prototyping s důrazem na metodu FDM. Všechny metody jsou zkoumány z hlediska možné recyklace používaných materiálů. Největší potenciál pro recyklaci vykazala metoda FDM. Byl tedy proveden rozbor základních používaných materiálů při tisku touto metodou. Následně práce popisuje princip recyklace při této metodě. V závěru byly provedeny ekonomické propočty, které měly podpořit nebo vyvrátit vhodnost recyklace při metodě FDM.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, ABS plast, Recyclebot

ABSTRACT

Purpose of this paper is analysis of basic Rapid Prototyping technologies including FDM. Technologies are compared in matter of possible recyclation of used materials. The largest recyclation potential appeared in case of FDM technology. There were conducted analysis of basic materials used in this method. Possible methods for recyclation were described. Finally, there were conducted economical analysis to evaluate viability of recyclation in case of FDM.

Key words

Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, ABS plastic, Recyclebot

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HELLEBRAND, Martin. *Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Martin Hellebrand

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

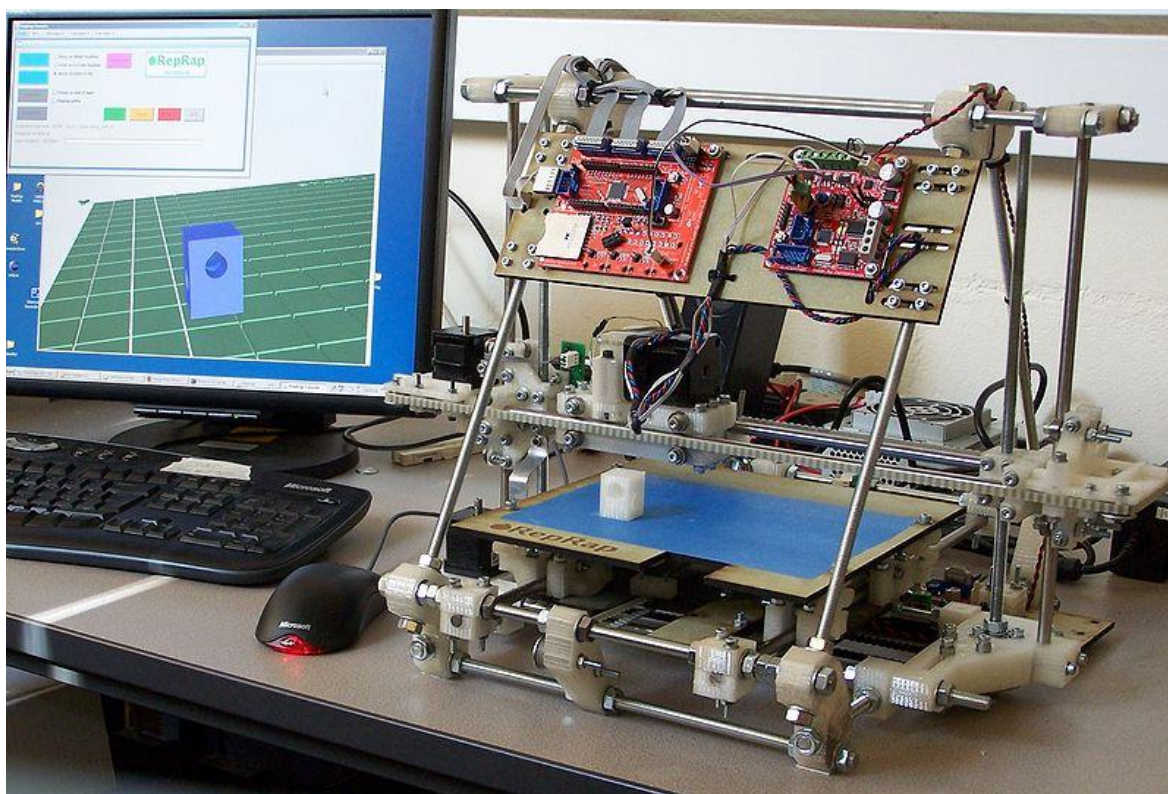
ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGIE METODY RAPID PROTOTYPING.....	9
1.1 Stereolitografie (SLA)	9
1.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	10
1.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)	11
1.4 Solid Ground Curing (SGC)	12
1.5 Fused Deposition Modeling (FDM)	13
2 PLASTY POUŽITELNÉ PRO TISK METODOU FDM.....	15
2.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	15
2.2 Polylactic acid (PLA).....	18
2.3 High Density Polyethylene (HDPE)	20
2.4 Polykarbonát (PC).....	20
2.5 Plniva v materiálech.....	22
2.5.1 Dřevěná plniva	22
2.5.2 Uhlíkem a sklem vytvrzené materiály	23
2.5.3 Plnivo na bázi křídý	23
3 MOŽNOSTI RECYKLACE PLASTŮ PŘI METODĚ TISKU FDM	24
3.1 Forma materiálu	24
3.2 Extrudéry produkující vlákna plastu	25
3.3 Ekonomické zhodnocení použití extrudéru	28
ZÁVĚR	32
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	33
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	37

ÚVOD

Poslední dobou se stále více prosazuje metoda Rapid Prototyping, která se již neobjevuje pouze v průmyslu, ale pomalu se dostává i do mnoha domácností. Její hlavní výhoda tkví v tom, že s její pomocí můžeme vyrábět jakkoliv složité součásti v kusové a prototypové výrobě za současně velmi příznivých výrobních nákladů. Získáváme tím tak poměrně levný nástroj, který je schopen nám odhalit konstrukční chyby výrobků, posouzení vzhledu výrobků a další důležité aspekty, které je třeba znát před rozjetím sériové výroby.

V poslední době však můžeme pozorovat nástup této technologie rovněž v domácnostech. To vše především díky open-source komunitnímu projektu RepRap (viz obr. 1), který vyvíjí a zdarma šíří domácí 3D tiskárnu. Díky ní lze z pohodlí domova produkovat náhradní díly na opotřebované spotřebiče v domácnosti a v podstatě veškeré plastové díly, které Vás napadnou. Jedinou věcí, kterou je potřeba si obstarat, je počítačový model součásti. Obsáhlá knihovna modelů je však přístupná i na internetu. Toto vše lze vyrobit s nízkými náklady, které tvoří především čas a dále energie s materiálem.

Právě v souvislosti s rozvojem 3D tisku v domácích podmínkách je vhodné dále uvažovat o snižování nákladů za používaný materiál. V současnosti se jako hlavní tiskový materiál pro domácí tiskárny používají vlákna nejrozličnějších druhů plastů. Jejich cena na trhu je však poměrně vysoká a proto se nabízí možnost recyklace nepovedených výtisků a tvorba vláken z granulí plastu. Tímto lze cenu materiálu, potažmo výrobku, ještě snížit.



Obr. 1 3D tiskárna RepRap¹.

1 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGIE METODY RAPID PROTOTYPING

Tato kapitola se bude věnovat rozdělení a popisu jednotlivých základních technologií Rapid Prototyping. Bude rozebrána také možnost a smysluplnost recyklace materiálů používaných při jednotlivých technologiích a to jak z hlediska využití odpadu vzniklého při tisku, tak recyklace hotových modelů.

1.1 Stereolitografie (SLA)

Tato metoda používá jako materiál modelů především fotopolymery. Jedná se o plasty měnící účinkem světla své vlastnosti. Modely jsou touto metodou stavěny v nádobě s kapalnou pryskyřicí vytvrzování pomocí laseru.²

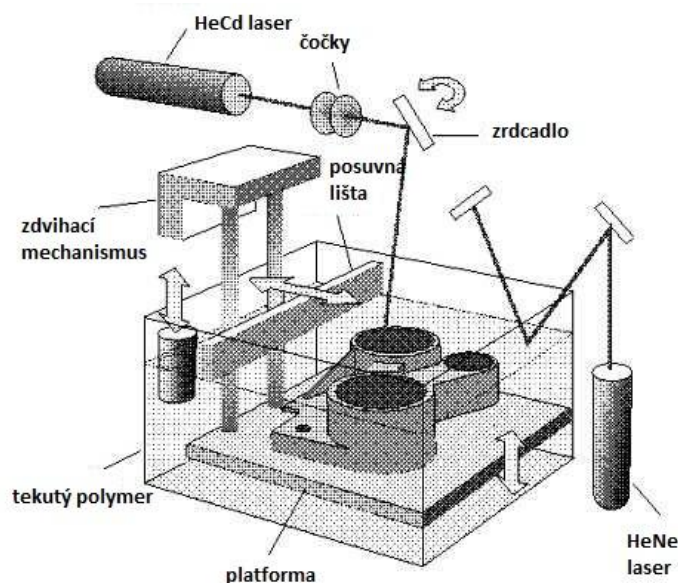
Samotný Stereolitograf se skládá ze tří hlavních částí. Jsou jimi pracovní komora, řídicí jednotka a opticko-laserový systém. V pracovní komoře nalezneme nádobu s tekutou pryskyřicí, platformu, která se pohybuje v jedné ose a stírací lištu, která zajišťuje konstantní tloušťku vrstvy. Řídicí jednotka ovládá veškerou činnost stroje včetně nastavení parametru laseru a samotnou stavbu. Opticko-laserový systém se skládá z laseru, soustavy čoček a zrcátek.³ Princip je znázorněn na obr. 2.

Pomocí laserového paprsku pracujícího v UV rozsahu dochází k vytvrzování modelu. Po vytvrzení laserovým paprskem dochází k poklesu platformy, srovnání hladiny stírací lištou na požadovanou tloušťku a následnému vytvrzení další vrstvy. Tloušťka vrstvy je důležitým parametrem a u této metody se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,15 mm.^{2,3}

Po dokončení tisku je nutno odstranit podpory, které při tisku zaručují tvarovou stálost modelu, umýt model od nevytvrzené pryskyřice a opracovat jej v UV komoře.²

Na trhu existuje celá řada materiálů. Mnohé z nich mají podobné vlastnosti jako plast ABS. Nevýhodou je, že materiál musí zaplnit celý zásobník stroje. Tímto by docházelo k velké spotřebě materiálu a prodražování výrobků. Běžně se tak tento problém řeší znovupoužitím nespotřebované pryskyřice ke stavbě dalšího modelu.⁴

Tato metoda bývá často používána k výrobě prototypů automobilových dílů. Dalším využitím může být výroba forem pro lití a vstřikování.²



Obr. 2 Princip Stereolitografie³.

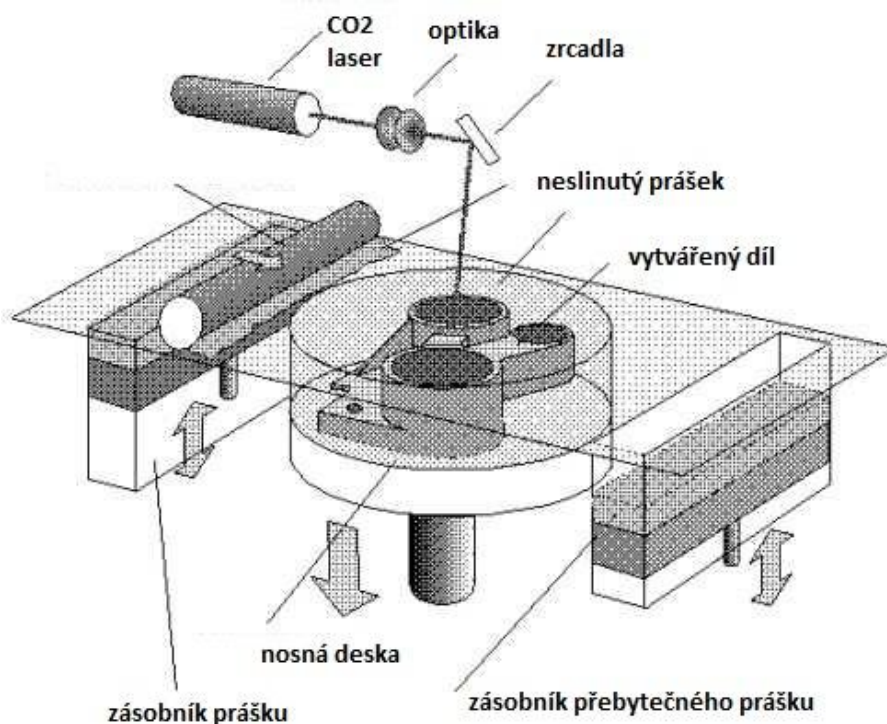
1.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Princip této technologie (viz obr. 3) je založen na spékání slévárenského písku, plastového nebo kovového prášku pomocí CO₂ laseru. Materiál, který není spečen, působí jako podpora.⁵ Výroba součástí probíhá po vrstvách. Po dokončení jedné vrstvy se platforma sníží o hodnotu odpovídající tloušťce vrstvy. Další vrstva prášku je pak nanесena válečkovým mechanismem. Tento proces se opakuje do doby vytvoření součásti. Pracovní komora je uzavřena a naplněna dusíkem, který zajišťuje ochranu atmosféru pro správný průběh slinování. Po dokončení procesu je nutné nechat model vychladnout a následně jej očistit od přebytečného prášku.²

Na výběr máme v případě této metody širokou paletu materiálů. Můžeme použít téměř jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví. Používají se především termoplasty jako polyamidy, kompozity polyamidů plněné skelnými vlákny nebo polykarbonáty. Další možností jsou kovové nebo keramické prášky.⁵ Právě podle použitého druhu materiálu technologii rozdělujeme:⁶

- Laser Sintering – Plastic
- Laser Sintering – Metal
- Laser Sintering – Ceramic
- Laser Sintering – Foundry Sand

Této technologii se využívá především při výrobě forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických nebo kovových výrobků.²



Obr. 3 Princip metody SLS.⁶

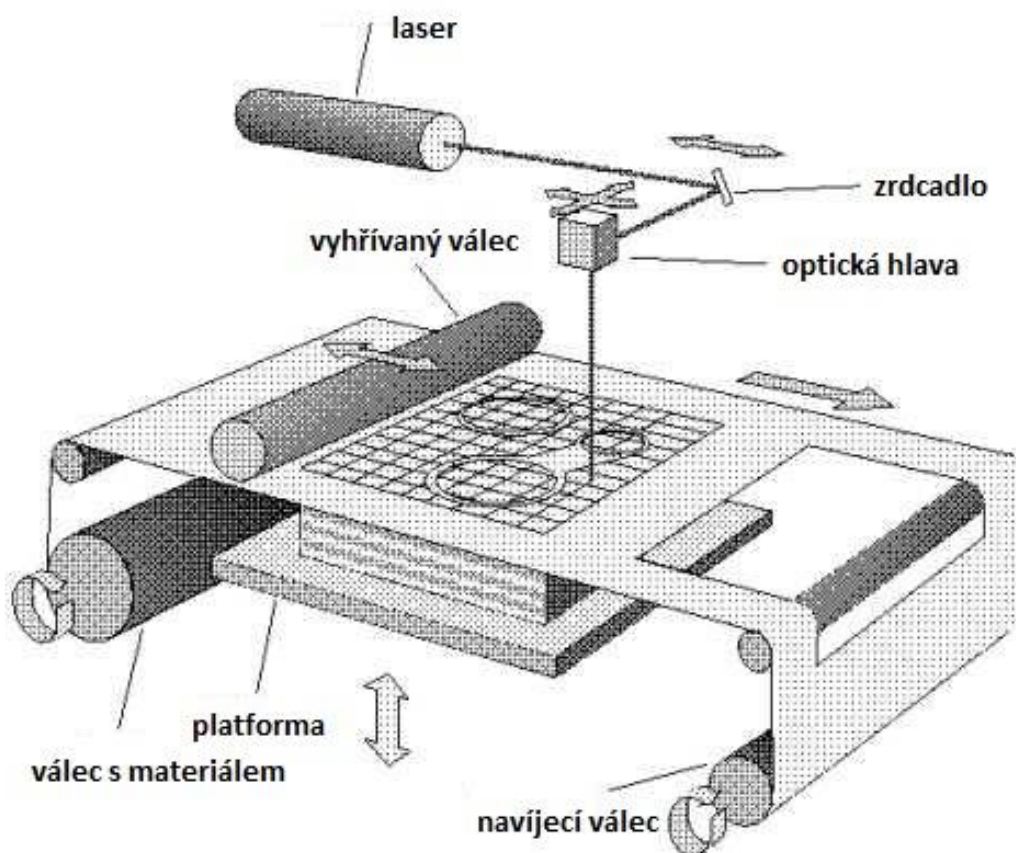
V poslední době se zkoumají možnosti recyklace nespotřebovaného prášku. Některé patentované systémy⁷ jsou schopny sbírat přebytečný prášek, následně jej ve vhodném poměru míchat s práškem čistým a opětovně tuto směs použít.⁸ Je však velmi důležité zvolit vhodný poměr čistého a použitého prášku, aby nebyly ovlivněny vlastnosti výsledné součástky.⁹ Při výrobě nefunkčních prototypů by bylo mírné zhoršení vlastností akceptovatelné, avšak při přímé výrobě je třeba dbát zvýšené pozornosti zvoleným poměrům prášků.

1.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Metoda je založena na postupném skládání velkého množství fólií na sebe. Princip lze vidět na obr. 4. Fólie jsou následně oříznuty do požadovaného tvaru oříznuty laserem. Jednotlivé fólie jsou k sobě připevňovány zahříváním jednotlivých vrstev vyhřívacím válcem a následným přitlačením poslední vrstvy k vrstvě předchozí. Přebytečná fólie je laserem rozdělena na čtverce a na konci procesu odstraněna. Nepotřebný materiál funguje jako podpora. Rychlost tvorby výrobku je oproti jiným metodám poměrně vysoká.¹⁰

Jako materiál bývá nejčastěji používán papír nebo plast (nylon, polyester). Nevýhodou této metody zůstává velké množství vytvářeného odpadu. Přímé znovupoužití odpadového materiálu ve tvaru kvádrů je nemožné.¹⁰

Modely vzniklé touto metodou se používají především pro účely vizualizace a marketing. Je možné je použít i jako formy pro odlévání a vstřikování.²



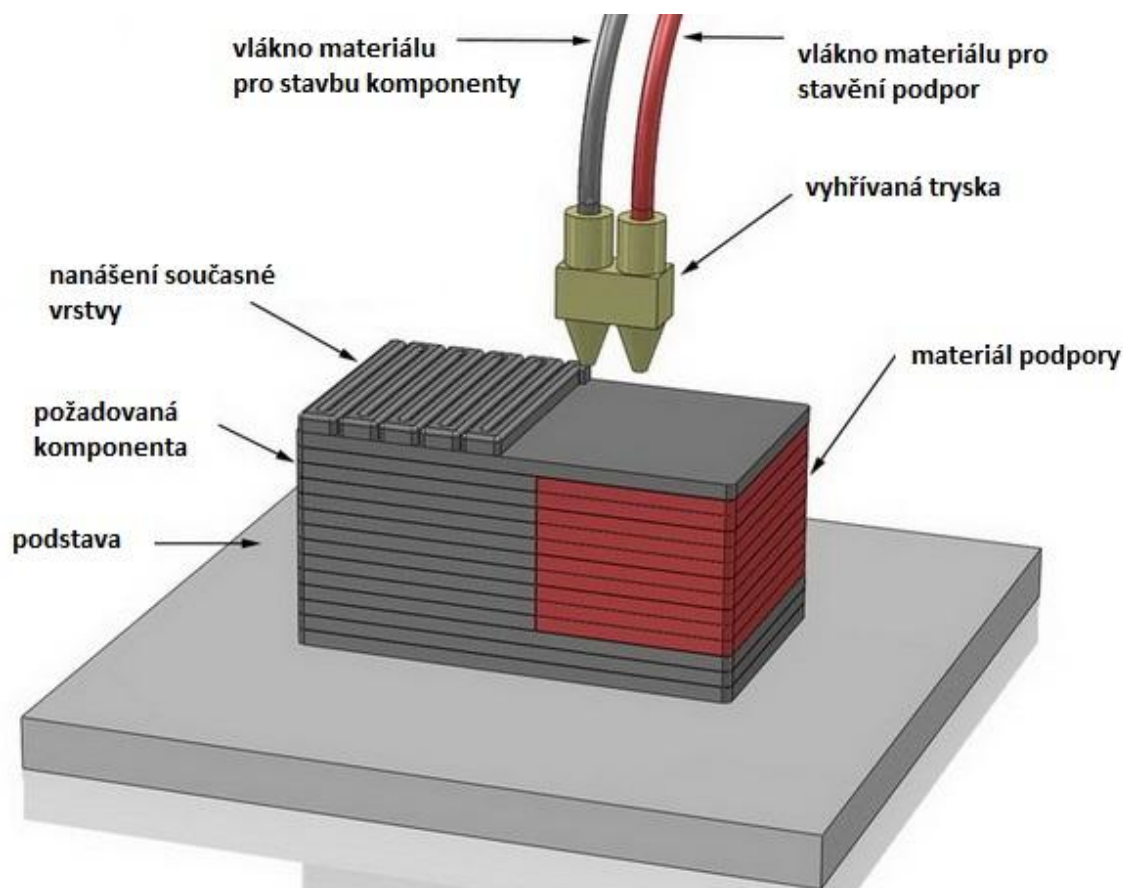
Obr. 4 Princip metody LOM.¹⁰

1.5 Fused Deposition Modeling (FDM)

Princip této metody (viz obr. 6) je založen na nanášení nataveného termoplastického materiálu postupně po jednotlivých vrstvách na podložku. Materiál je ve formě drátu navinut na cívce a vtlačován do vyhřívané trysky, která jej následně distribuuje na podložku. Ta se pohybuje v osách X a Y nad pracovní deskou.² Materiál je ohříván na teplotu jen nepatrně vyšší, než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou vrstvu, která během jedné desetin sekundy ztuhne. Běžná pracovní deska umožňuje vertikální pohyb, protože se musí po každém nanesení vrstvy posunout o jednu pracovní vrstvu. Metoda vyžaduje stavbu podpor, které se následně chemicky nebo mechanicky odstraní.¹⁰

Vzhledem k povaze technologie je možné vyrábět funkční prototypy, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům.²

Jako hlavní materiály jsou používány především plasty ABS, PLA, polykarbonáty, elastomery a vosky. Výhodou metody je fakt, že při výrobě vzniká jen minimální odpad, který tvoří materiál podpor.²



Obr. 6 Princip metody FDM.¹²

Velmi zajímavý vývoj má v oblasti FDM recyklace vytisknutých modelů a nepovedených výtisků. V poslední době se objevují jednoduché recyklační systémy, které jsou schopny z již nepotřebných modelů znovu vytvářet vlákno, v jehož formě je materiál do tiskárny dodáván.¹³

V případě ostatních technologií Rapid Prototyping je vhodné uvažovat pouze nad recyklací nespotřebovaného, přebytečného materiálu. Recyklace hotových součástí, kterou řeší recyklační systémy pro FDM tisk, při těchto metodách obvykle nedává smysl, případně je to zcela nemožné. Jako příklad nemožnosti recyklace hotových modelů lze uvést metodu Stereolitografie, jelikož z laserem vytvrzeného polymeru nelze tak snadným způsobem v prostředí výrobního prostoru, jako u metody FDM, vytvořit materiál připravený k okamžitému použití, což je v případě Stereolitografie tekutý polymer. Naprosto stejná situace nastává u metody SLS, kdy zpětná tvorba prášku z hotových modelů není možná. Ještě více se toto projevuje u kovových prášků, kde je to vlivem oxidace zcela vyloučeno. Při metodě Laminated Object Manufacturing se opět projevuje nemožnost recyklace modelů do formy papírových, či plastových fólií v prostředí výroby.

Fused Deposition Modeling tedy zůstává jedinou metodou, při které má recyklace hotových modelů do formy použitelného materiálu smysl. Z tohoto důvodu je účelné se zaměřit právě na recyklaci při používání této technologie.

2 PLASTY POUŽITELNÉ PRO TISK METODOU FDM

Z kapitoly 1 je zřejmé, že recyklace plastů pro potřeby 3D tisku má největší smysl v případě metody Fused Deposition Modeling. Je tedy vhodné se zaměřit na plasty vhodné pro použití při této metodě. Bude se tedy jednat především o termoplasty. Nicméně ne všechny termoplasty jsou pro použití při metodě FDM vhodné. Je potřeba brát na zřetel především tři hlediska. První je možnost transformace plastu do požadované formy nutné k tisku. Při metodě FDM se jedná o vlákno plastu diametru několika milimetrů namotané na cívce. Za druhé je to komfort používání při samotném tisku a jako třetí hledisko kvalita a vlastnosti výrobku, který byl daným plastem vytisknut. V tomto případě se jedná např. o sílu, výdrž, odolnost a mnoho dalších vlastností. V některých případech se může plast jevit z některých hledisek pro použití při FDM naprosto nevhodný, ale v jednom z hledisek může ostatní materiály převyšovat takovým způsobem, že je vhodné jej přesto používat. Takovým příkladem může být polykarbonát (viz kapitola 2.4).

Těmto hlediskům vyhovují především plasty ABS, PLA, HDPE a polykarbonát. Některé materiály je možno mezi sebou i míchat, případně používat plniva a dosahovat tak odlišných vlastností.

Důležité je zhodnotit jednotlivé plasty z hlediska vlivu na vlastnosti konečného výrobku, cenu, skladování, pracovní komfort při jejich používání, možnosti jejich vzájemného mísení, dostupnost, formu a možnosti znovupoužití při zohlednění míry degradace.

2.1 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Jedná se o často používaný termoplast při metodě Fused Deposition Modeling. ABS je amorfní látkou, což znamená, že nemá pravidelnou strukturu a skutečný bod tání.¹⁴ Pro tisk je však běžných 230° C.¹⁵ Jedná se o ropný produkt.¹⁴

Hlavními výhodami tohoto plastu jsou jeho tvrdost a odolnost při nízké hmotnosti. Nejlepší vlastnosti prokazuje při teplotách -20 až 80° C. Má lepší mechanické vlastnosti než levnější HDPE a je méně křehký oproti PLA. Pro metodu FDM je důležitý jeho koeficient tření, který je např. v porovnání s PLA nižší, což umožňuje použití nižších protlačovacích sil při tisku. Z toho plyne jeho výhodnost při tvorbě malých součástek. Nevýhodou je však použití vyšších teplot při protlačování. ABS je rozpustný v Acetonu.¹⁶

Největší překážkou pro tvorbu přesných součástí z ABS plastu je jeho tendence kroutit se při dotyku s podstavou 3D tiskárny. Problém se násobí s rostoucí velikostí modelů. Řešením tohoto problému je vyhřívání podstavy a udržování čistého a rovného povrchu. Při tvorbě ostrých přechodů je možné využít chlazení. K měknutí dochází při vyšších teplotách, než v případě PLA, což dělá součásti tvořené z plastu ABS více odolné vůči kroucení při vyšších teplotách. K dokončování je možno použít akrylové barvy. Dosahovaná přesnost modelů tohoto plastu je obecně v porovnání s PLA vyšší, takže je snazší dodržet předepsané tolerance.¹⁵

Vlákno plastu je vhodné nevystavovat zbytečnému vlivu vlhkosti, jelikož dlouhodobou vyšší vlhkostí zasažený ABS plast může při tisku prokazovat tvorbu bublin či rychlé výstřiky z trysky. Bude snížena vizuální kvalita součástky, její přesnost a zvýší se pravděpodobnost ucpání trysky. ABS může být snadno vysušen a zbaven vlhkosti pomocí zdroje teplého, ideálně suchého, vzduchu.¹⁶

Zejména pro tisk v kanceláři nebo domácích podmínkách je důležité brát v potaz i komfort tisku. Ten bude v případě tohoto termoplastu ovlivňován jeho pachem. Na rozdíl od PLA

plastu je při tisku možno pozorovat většinou osob nepříjemný zápach.^{15,16} Je proto nutné zajistit kvalitní ventilaci pracovních prostorů.

Původní barva plastu ABS je krémově bílá (viz obr. 7). Tiskový materiál v této barvě je nejlevnější¹⁷, protože u něj nejsou nutné další operace vedoucí k obarvení. Pro součásti, u kterých nezáleží na barvě bývá tedy vhodnější použití bezbarvého vlákna. Další výhodou je potom fakt, že jsou chyby tisku na této barvě vidět nejméně.¹⁶



Obr. 7 Neobarvený plast ABS.¹⁸

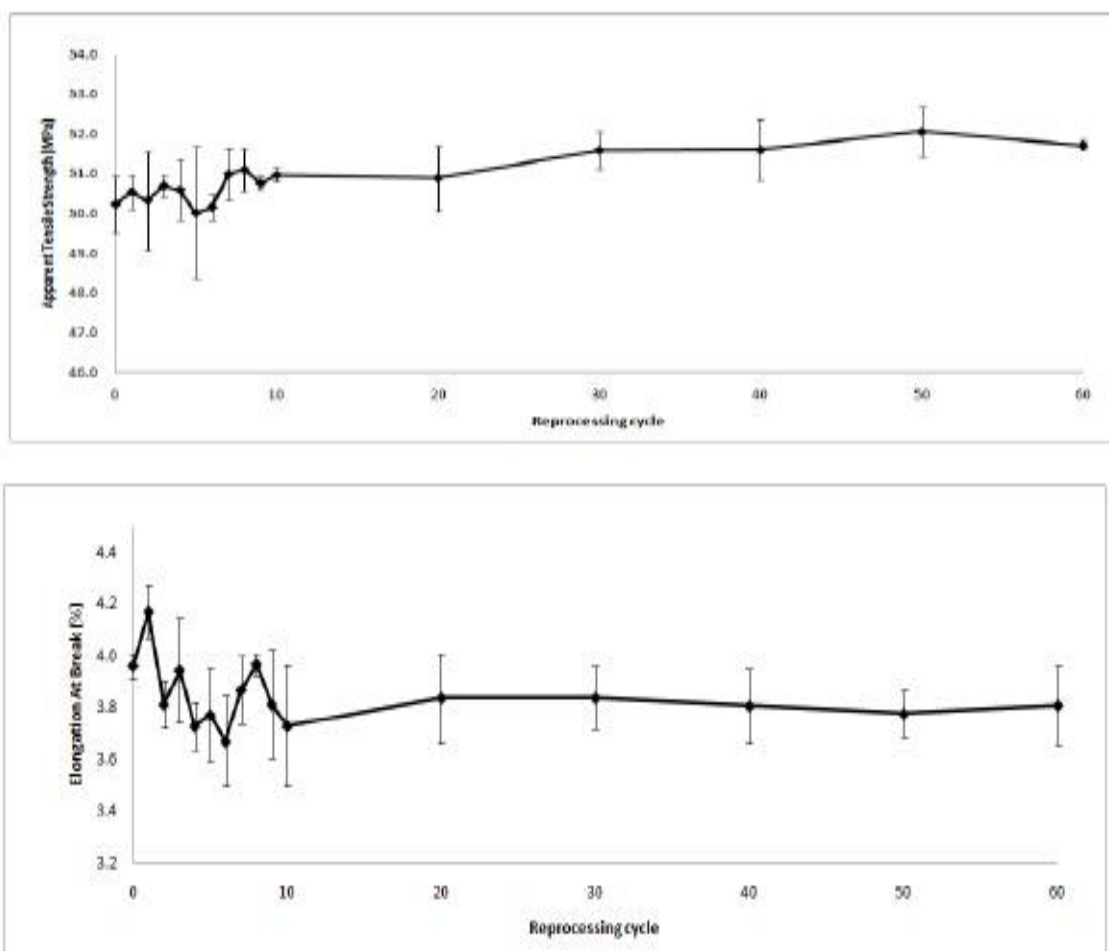
Možnosti recyklace jsou u plastu ABS omezeny. Chceme-li zachovat stejné mechanické vlastnosti jako při použití čistého ABS, nelze jej opakovaně recyklovat a následně použít 100% recyklovaného materiálu. Bylo vydáno již několik vědeckých studií^{19,20,22,23} na téma recyklace ABS plastu, které ukazovaly vliv opakovaného recyklování na jeho vlastnosti. Další studie hodnotila 10 recyklačních cyklů a hodnotila jejich vliv na mechanické a chemické vlastnosti.²¹ Všechny zmíněné studie pracovaly se 100 % recyklovaným ABS. Studie jednoznačně ukázaly, že při jednotlivých cyklech dochází k termo-mechanické degradaci materiálu a dochází ke štěpení polymerního řetězce. To zapříčiňuje změnu mechanických vlastností materiálu.

Následující studie²³ sledovala vliv opakované recyklace ABS plastu s obchodním názvem Terluran GP-22 výrobce BASF. Polymer byl podroben opakovanému lisování na extrudéru Haake PTW 16. Následně bylo provedeno vstřikování do formy a testování vlastností výrobku. Výsledek ukázal, že vlastnosti plastu jsou po prvních pět cyklů konstantní.

V následujících cyklech však dochází k prudkému zhoršení mechanických vlastností a tmavnutí barvy plastu.

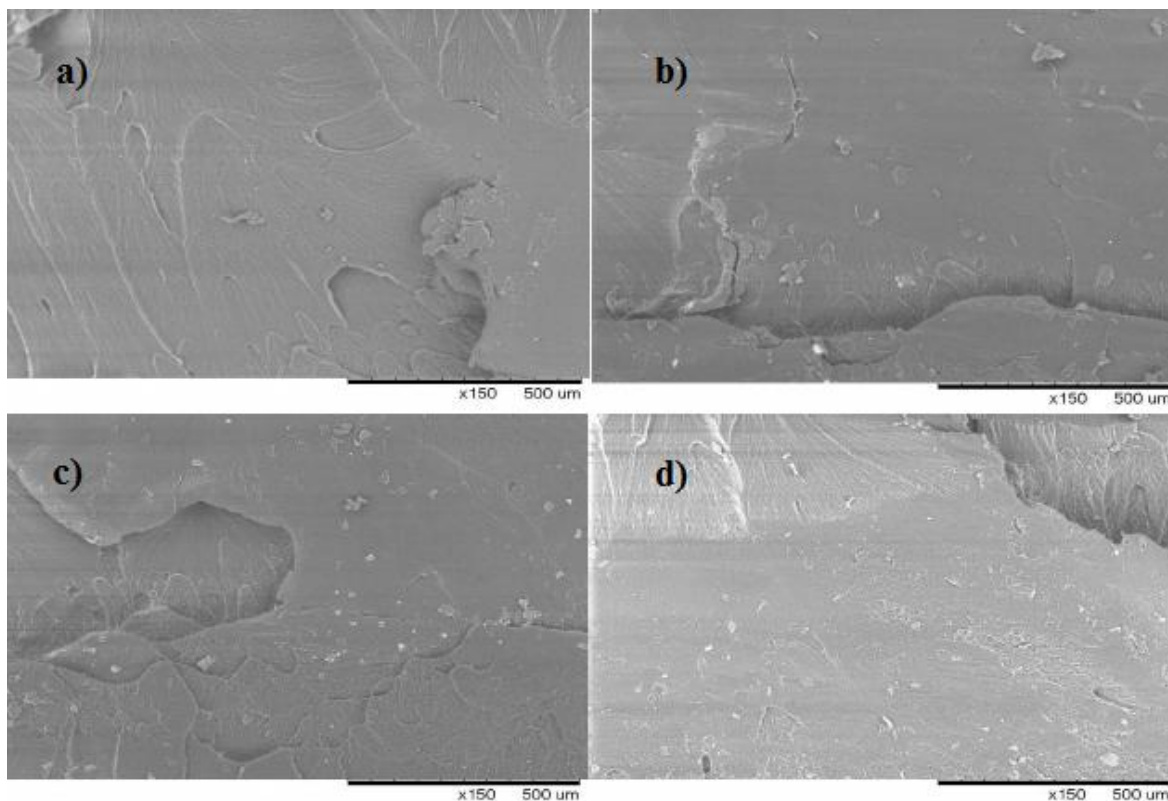
Chceme-li zachovat ideální, neměnné vlastnosti po více cyklů recyklace, je potřeba recyklovanou část plastu mísit s čistými granulemi. Další studie²⁴ ukázala, že při mísení 15 % recyklovaného materiálu s 85 % čistého materiálu ve formě granulí nevykazuje výsledný výrobek žádnou změnu mechanických vlastností. Na tuto studii navazuje další¹⁹, která používá mísení v poměru 20 % recyklovaného materiálu a 80 % čistého materiálu. Tato studie byla provedena v počtu šedesáti recyklačních cyklů. Byl testován vliv na tahové vlastnosti a bylo provedeno pozorování pomocí mikroskopu.

Výsledky napětí v tahu a prodloužení jsou ukázány na obrázku 8. Při 100 % recyklaci ABS materiálu dochází k štěpení polymerního řetězce, což vede k poklesu pevnosti v tahu a procenta prodloužení^{20,22}. Při použití pouze 20% recyklovaného materiálu je však z grafu zřejmé, že pevnost v tahu zůstává téměř konstantní. Prodloužení má v prvních deseti cyklech tendenci se snížit. V následujících cyklech je již prodloužení konstantní.



Obr. 8 Výsledky napětí v tahu (nahore) a míry prodloužení (dole) v závislosti na počtu provedených cyklů.¹⁹

Na následujícím obrázku 9 lze vidět mikrostrukturu plastu po čtyřech různých množstvích cyklů recyklace. Ani po šedesátém cyklu nebylo zaznamenáno větší množství mikrotrhlin. Na fotografiích je však patrná tvorba bílých oblastí, které jsou zapříčiněny degradací polybutadienu, což má za následek snížení míry prodloužení. Toto potvrzuje obrázek 8.



Obr. 9 Mikrostruktura plastu po čtyřech různých množstvích cyklů recyklace¹⁹.

a) 10 cyklů, b) 40 cyklů, c) 50 cyklů, d) 60 cyklů

Tato studie tedy dokázala, že recyklace 20 % materiálu s 80 % čistého ABS materiálu je použitelná v praxi a to až pro 60 cyklů recyklace. Pro lepší využití materiálu by bylo třeba provést další studie pro ověření možného vyššího počtu cyklů a zvýšení procenta znovupoužitého materiálu. V této bakalářské práci budu uvažovat možnost recyklovat plast ABS v poměru 20:80 ve prospěch čistého materiálu.

2.2 Polylactic acid (PLA)

Jedná se o termoplast, který je produkován z přírodních zdrojů, jako je např. kukuřice. Je to často používaný materiál pro běžné tiskárny založené na metodě FDM. Je poměrně levný a dostupný ve formě vlákna pro 3D tiskárny.²⁵

Teplota tání plastu PLA je vzhledem k ostatním termoplastům poměrně nízká (od 180° C do 220° C). Koeficient tření je v porovnání s ABS vyšší. Je rozměrově stálý. Z tohoto důvodu není třeba používat vyhřívanou podstavu. Při vhodném chlazení se zdají být rychlosti tisku při použití plastu PLA vyšší než u ABS. Vzhled vytištěných součástí je oproti tisku s materiálem ABS lesklejší, což lze vidět na obrázku 10.^{16,26} Hlavní nevýhodou je jeho nízká teplota tání.²⁵

Součástky při tisku plastem PLA se v porovnání s ABS tolik nedeformují. Při roztavení je PLA o mnoho tekutější. Při aktivním chlazení lze dosáhnout ostřejších detailů bez rizika kroucení materiálu.¹⁶



Obr. 10 Součást vytisknutá materiálem PLA (vlevo) a ABS (vpravo).²⁶

Stejně jako v případě ABS není vhodné vystavovat PLA vlhkosti. Vlhkost v materiálu způsobí tvorbu bublin v trysce a náhlé vystřikování materiálu ven z trysky. Lze si také povšimnout zhoršení barvy a celkových vlastností modelu. Vysoušení je možné opět horkým, suchým vzduchem.¹⁶

Pro kancelářské prostory je použití PLA výhodnější z hlediska komfortu tisku, protože je jeho zápach v porovnání s ABS snesitelnějším.^{16,25}

Máme-li porovnat vhodnost použití PLA a ABS plastu, můžeme říci, že PLA je vhodnější pro tisk v kancelářích, tzn. pro školy a hobby nadšence. ABS plast je vhodný spíše pro profesionální použití. Základní porovnání plastů ABS a PLA naleznete v tabulce 1.

Tab. 1 Porovnání dvou nejpoužívanějších plastů při metodě FDM.

ABS	PLA
Tisk při teplotě cca 225°C	Tisk při teplotě cca 180-200°C
Vyžaduje vyhřívanou podstavu tiskárny	Těží z vyhřívané podstavy tiskárny
Možný tisk bez chlazení	Velmi těžší z chlazení při tisku

Dobrá přilnavost k polyamidové pásce	Dobrá přilnavost k mnoha povrchům
Náchylný ke kroucení	Náchylný ke kroucení rohů
Flexibilnější	Křehčí
Možno pojít lepidly a rozpouštědly	Možno pojít lepidly
Nepříjemný zápach při tisku	Snesitelnější zápach
Ropný produkt	Přírodní produkt

Jelikož se jedná o poměrně nový druh plastu, není ještě příliš známý vliv degradace materiálu při opětovném použití, protože nebylo provedeno dostatečný počet studií. Některé studentské projekty, jako například Perpetual Plastic Project²⁷, využívají plastových nádob a kelímků vyrobených z PLA plastu jako vhodného zdroje pro recyklaci a následné použití v 3D tiskárnách. Z jejich strany však nebyly provedeny žádné výzkumy na téma degradace materiálu opakovanou recyklací. Z tohoto důvodu bude nutno provést další testy.

2.3 High Density Polyethylene (HDPE)

HDPE je termoplast, jenž je možno použít i pro 3D tisk metodou FDM. Jedná se o ropný produkt.²⁸

Tento plast je velmi silný, levný a odolný. Bod tání je 110° C. Jeho podstatnou nevýhodou je fakt, že se velmi špatně lepí k čemukoliv jinému než k sobě nebo PE a PP. Při tisku větších objektů má tendenci se kroutit. Z těchto důvodů je použití poněkud problematictější.²⁹

Pro dosažení lepších vlastností je možno smíchat HDPE s ABS plastem. Oba plasty mohou být používány za stejných teplot (220 až 240° C). Bylo by tedy teoreticky možné zásobovat jednu vyhřívanou trysku dvěma dráty. Jedním z ABS a druhým z HDPE. Základ modelu by tak byl ze 100 % vyroben z ABS, což by řešilo špatnou přilnavost HDPE k podkladu a postupně by bylo možné zvyšovat podíl HDPE.³⁰

Recyklace je možná. Vlastnosti recyklovaného HDPE sledovala studie z Thajska.³¹ Bylo testováno pět vzorků. Jednalo se o směsi čistého HDPE s 0%, 20%, 25% a 50% recyklovaného HDPE plastu. Vzorky, které byly vstříkovány do formy, byly následně testovány z hlediska hustoty, pevnosti v tahu a míry prodloužení. Výsledky ukázaly, že se zvyšujícím se podílem recyklovaného HDPE se radikálně snižovala pevnost v tahu a zvyšovala se míra prodloužení.

Vzhledem k problematickému tisku tohoto plastu se mu v této bakalářské práci dále nebudu věnovat. V případě, že by byly vyřešeny problémy při jeho tisku, bylo by HDPE možno recyklovat přímo v domácnostech. Použitím open-source recyklačních zařízení (viz kapitola 3.2) by tak bylo snadné recyklovat obaly potravin a ty dále použít jako náplň do 3D tiskáren.

2.4 Polykarbonát (PC)

Jedná se o velmi silný a nárazu odolný termoplast. Díky svým vlastnostem je využíván např. i při výrobě neprůstřelného skla. Je dobře odolný vůči vysokým teplotám a díky

svým vlastnostem je použitelný i pro tisk při metodě FDM.³² Jeho vhodných vlastností si všimla i vedoucí firma na trhu Stratasys a zařadila jej spolu s ABS materiály do svého portfolia.³³

Polykarbonát je možno ohýbat a formovat za studena bez jakéhokoliv porušení či deformace. Při denním světle je čistě průhledný (při tisku však mění barvu do šeda, což lze vidět na obr. 11). Při 150° C začíná tento materiál měknout a při teplotách okolo 300° C začíná tect.³²



Obr. 11 Součást vytištěná polykarbonátem na tiskárně RepRap.³⁴

Jak už bylo naznačeno dříve, polykarbonát je díky vlastnostem hotových modelů zajímavým materiálem pro 3D tisk. Nevýhodou, která brání většímu použití v amatérských domácích podmínkách, je tendence se kroutit při tisku. Dochází k většímu kroucení, než při použití plastů ABS nebo PLA. Řešením je potom především využití vyhřívané podstavy, která kroucení zamezuje. Vláknو vykazuje při tisku vlastnosti bližší ABS, nežli PLA. Přílnavost jednotlivých vrstev je tedy dobrá. Další nepříjemností je snížení pracovního komfortu. Při tisku polykarbonátem dochází v porovnání s ABS k rozprašování velkého množství jemných mikročástic. Z tohoto důvodu je vhodné nepodceňovat ventilaci místnosti. V případě příliš blízkého kontaktu s polykarbonátem při tisku může docházet ke štípání očí. Tyto důvody vedou k omezenému použití v kancelářských prostorách.³⁵

Polykarbonát je velmi hygroskopický, takže je schopen absorbovat vlhkost z okolního prostředí. Vlhkost ve vlákně může způsobovat tvorbu bublin při tisku a špatnou kvalitu tisknuté součásti.³²

V automobilovém průmyslu je používáno mísení polykarbonátu s ABS. Výsledkem je kombinace síly a tepelné odolnosti polykarbonátu a pružnosti ABS. Při metodě 3D tisku je záměrem mísení těchto dvou materiálů dosažení nižší potřebné teploty při tisku.³⁵

Následující studie³⁶ zkoumala možnosti recyklace polykarbonátu a vliv recyklování na vlastnosti modelů. Bylo vytvořeno několik vzorků, které se lišily poměrem mezi čistým a recyklovaným polykarbonátem. Bylo zkoumáno 0, 5, 10, 15, 20, 50, 100 % obsahu recyklovaného vůči čistému polykarbonátu. Výsledkem bylo zjištění, že vzorky s obsahem méně než 15 % recyklované části vykazovaly téměř stejné vlastnosti, jako vzorky se 100 % podílem čistého polykarbonátu. Toto platí za předpokladu zachování vysoké čistoty materiálu.

2.5 Plniva v materiálech

Jedná se o pevné materiály, které se přidávají nejčastěji do polymerů, aniž by s nimi jakkoliv chemicky reagovaly. Zůstávají inertní, ale přidávají požadované mechanické nebo jiné vlastnosti do vzniklé směsi. Účelem přidávání plniv může být např. změna hustoty materiálu, zpevnění, zvýšení odolnosti proti oděru a zlepšení tepelných vlastností. Někdy jsou plniva použita jen ke zředění z důvodu snížení ceny materiálu. Plnivem může být každý drobný materiál, který je vůči hlavnímu materiálu chemicky inertní a dodá požadované vlastnosti.³⁷ Mezi takové materiály lze například zařadit písky, mramorové prášky, dřevěné prášky, keramické prášky, sklo, papír atd.³⁸ Níže naleznete ukázky zajímavých plniv, ze kterých jsou vyráběny vlákna pro tisk.

2.5.1 Dřevěná plniva

Kompozity na bázi dřeva jsou směsí recyklovaného dřeva s polymerem, který dřevěný prášek spojuje. Příkladem může být vlákno LAYWOO-D3.³⁹ Tento kompozit má tepelnou odolnost velmi podobnou materiálu PLA. Tiskové teploty se pohybují mezi 175 až 250° C. Při nižších teplotách je vzhled modelu světlejší. Naopak při vyšších teplotách je výsledný povrch tmavší.³⁹

Výsledný model (viz obr. 12) vypadá velmi podobně jako by byl vyroben ze dřeva. Vůně je také věrohodná. Podíl dřevěného prášku je obvykle 40%. Materiál se při tisku nekrouť a dobře přilne k podkladu. Po tisku jej je možné povrchově upravit nátěrem.³⁹



Obr. 12 Model vytisknutý materiálem s dřevěným plnivem.⁴⁰

2.5.2 Uhlíkem a sklem vytvrzené materiály

Pro změnu mechanických vlastností výsledného modelu lze využít uhlíková a skleněná vlákna.

Příkladem může být uhlíkovým vláknem vytvrzený plast PLA. Materiál se stane tužším a odolným vůči ohnutí. Takto plněný materiál nevyžaduje vyhřívanou podstavu, jako běžný PLA plast. Materiál je možno tisknout při teplotách okolo 200° C. Nevýhodou je však v tomto případě velká křehkost materiálu.⁴¹

Uhlík rovněž vede lépe teplo, což má za následek lepší tepelnou odolnost v porovnání se samotným PLA.⁴¹

2.5.3 Plnivo na bázi křídý

Smísením křídového prášku s termoplastem lze dosáhnout velmi zajímavé textury povrchu modelu. Ten se tak stane drsným.⁴³ Povrch věrohodně připomíná vzhled keramiky, o čemž se lze přesvědčit na obr. 13.



Obr. 13 Hrníčky vytištěné materiálem s plnivem na bázi křídý.⁴²

Možnosti recyklace materiálů s těmito plnivy jsou značně omezené. Recyklace by byla velmi složitá a nedávala by smysl. Z tohoto důvodu se těmto materiálům z hlediska recyklace dále nebudu věnovat.

3 MOŽNOSTI RECYKLACE PLASTŮ PŘI METODĚ TISKU FDM

Jak již bylo zmíněno v kapitolách výše, většina plastů používaných pro 3D tisk technologií FDM je recyklovatelných. Vzhledem k poměrně vysokým cenám materiálu ve formě vlákna se nabízí možnost využít k tisku již vytisknuté a nepovedené modely. Ty bude nutno, jak bylo napsáno v druhé kapitole, smíchat s granulemi čistého plastu, aby bylo dosaženo stejně kvalitních výtisků jako z nového materiálu. K tomuto bude potřeba proměnit recyklované součásti do formy vlákna, které jsou schopny 3D tiskárny použít. V poslední době se objevují speciální zařízení schopná z granulí a kousků plastů vytvářet potřebné vlákno v dostatečné kvalitě, což přináší zajímavá řešení hodná vyzkoušení.

3.1 Forma materiálu

Všechny materiály používané při metodě FDM jsou pro tisk k dispozici ve formě vlákna nejružnějších barev. Vlákna jsou nabízena běžně v rozměrech o průměru 3 mm a 1,75 mm. Každá tiskárna pracuje jen pro jeden z rozměrů. Důležitým ukazatelem pro kvalitu vlákna je jeho rozměrová stálost, což znamená dodržení předepsané rozměrové tolerance. Vlákna o rozměru 3 mm by v žádném případě neměla přesahovat průměr 3 mm. Jmenovitá hodnota většiny výrobců je 2,88 mm. Kvalitu vlákna lze hodnotit podle množství tzv. lumps, což jsou krátké úseky vlákna v řádech několika centimetrů, jejichž průměr je větší než dovolená tolerance. Neck-downs jsou potom místa, kde je průměr vlákna nižší, než je předepsaná tolerance. Nekvalitní vlákno s velkým počtem těchto nedokonalostí má podstatný vliv na samotný tisk.⁴⁴

Samotné vlákno je dodáváno buď ve formě namotané na kotoučích nebo volně namotané. S kotouči je práce snadná, protože je jejich skladování a transport nejsnazší, vydávají vlákno snadno a rovnoměrně. Největší nevýhodou je jejich váha, která často tvoří třetinu celé váhy kompletu⁴⁴, což může značně prodražovat poštovné. Volně namotané vlákno je potom z hlediska váhy vhodnější pro transport. Rozdíl mezi oběma formami je k vidění na obrázku 14.



Obr. 14 Vlákno ve formě volně namotaného vlákna (vlevo) a namotaného na kotouči (vpravo).⁴⁵

Tab. 2 Cena kilogramu materiálu ve formě vlákna.

Materiál ve formě vlákna	Cena za kg
ABS 3 mm vlákno	Od 450,-Kč
PLA 3 mm vlákno	Od 450,-Kč
Polykarbonát 3 mm vlákno	Od 1500,-Kč

Tab. 3 Cena kilogramu materiálu ve formě granulí.

Materiál ve formě granulí	Cena za kg
ABS granulát	Od 60,-Kč
PLA granulát	Od 160,-Kč
Polykarbonát granulát	Od 160,-Kč

Stejné materiály, pouze ve formě granulí jsou v prodeji také. Cena je výrazně nižší, což dokumentují tabulky 2 a 3 (nejnižší nalezené maloobchodní ceny platné k dubnu 2014). V České republice jsou ceny vláken vyšší. Granulát je u nás také obtížně sehnatelný. Mnozí zahraniční prodejci však nabízejí poštovné zdarma po celém světě, což nám dostupnost dosti zlepšuje. Problémem však zůstává fakt, že tiskárny si s materiálem v takové formě neumějí poradit. Proto je potřeba jej transformovat do formy vlákna o průměru 3 nebo 1,75 mm.

Zajímavostí také je, že lze zakoupit i obarvující granulát, který je v množství už pár gramů na kg granulovaného materiálu schopen změnit barvu plastu.⁴⁶

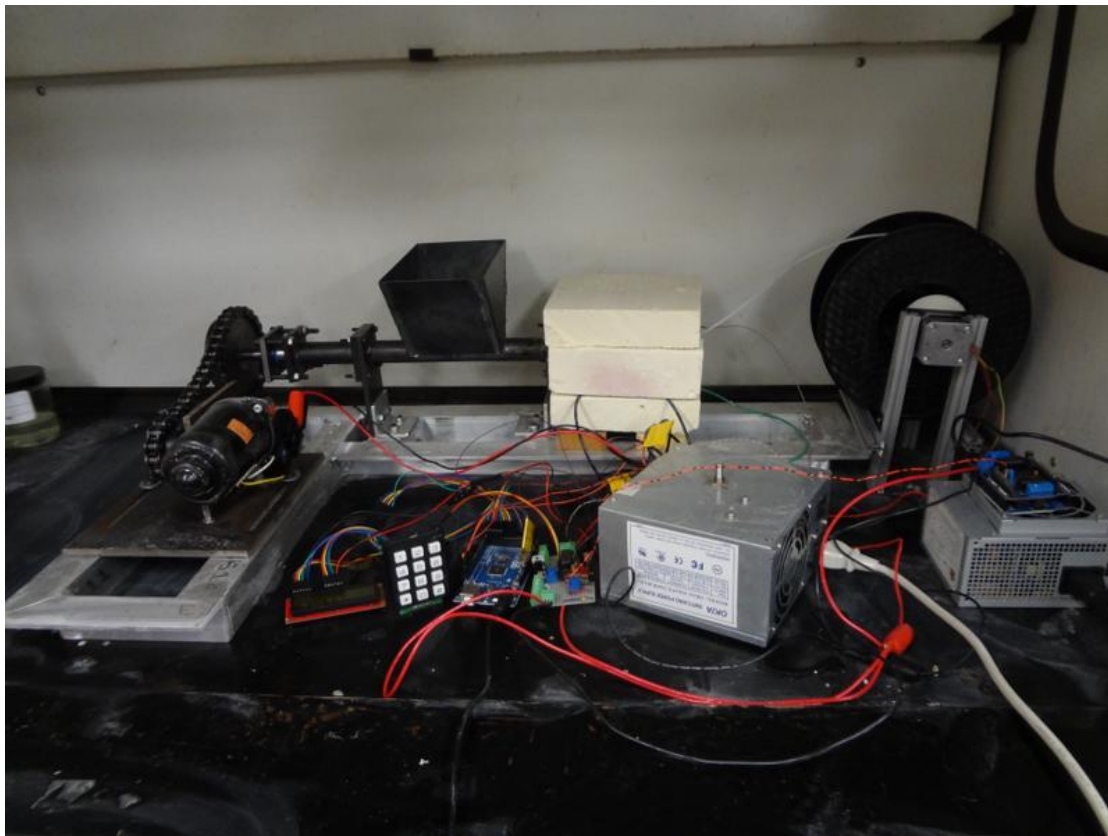
3.2 Extrudéry produkující vlákna plastu

Jak již bylo zmíněno, v poslední době se objevují projekty, které řeší zmíněný problém. Speciální zařízení jsou tak schopna z granulátu a rozdrcených plastových výrobků produkovat vlákno použitelné v 3D tiskárnách. Příkladem mohou být zařízení jako je Filabot⁴⁷, Lyman Filament Extruder⁴⁸ nebo Recyclebot⁴⁹.

Původním záměrem některých systémů bylo spojit tiskárnu s takovýmto zařízením tak, aby bylo vyrobené vlákno přímo používáno tiskárnou. Bohužel toto se projevilo jako problematické. Proud vlákna se totiž často zastavoval díky vlivu zpětného tlaku od tiskárny. Proto produkují tato zařízení nejdříve vlákno a teprve následně je toto vlákno standardně ručně umísťováno do tiskárny.⁵⁰

Zřejmě nejrozšířenějším extrudérem je Recyclebot, který je silně inspirován projektem Web4Deb, což je zařízení, které recykluje použité HDPE láhve a HDPE granulát k výrobě proužků použitelných k pěstování rostlin v hydroponii.⁵¹ Recyclebot je prací skupiny nadšenců z Michiganské univerzity. Vydáno už bylo několik verzí, které jsou volně šiřitelné. Návod na Recyclebota je bez problémů k nalezení na internetu.⁴⁹ Samotnou sestavu lze vidět na obrázku 15.

Extrudéry pracují na principu šroubovitého protlačování materiálu skrze vyhřívanou hlavěň, kde je následně stlačován, promícháván a tlačěn skrze lisovací formu pro dosažení tvaru vlákna.⁴⁹



Obr. 15 Recyclebot.⁵²

V případě, že požadujeme vytvoření vlákna z nepovedených a starých výtisků, je potřeba tyto modely nejdříve nějakým způsobem rozdrtit na menší kousky. Celé součásti totiž není schopen Recyclebot zpracovat. Bylo tedy třeba najít zařízení, které bude schopno toto rozdrčení vykonat. Studenti z univerzity v Delftu vydali studii⁵³, která hledá mimo jiné co nejúčinnější zařízení, které lze k tomuto účelu použít. Jako nejlepší řešení se ukázal klasický kuchyňský mixér. S úspěchem se rovněž používá obyčejný skartovací stroj, který je používán v běžných kancelářích. Nevýhodou je fakt, že objemnější díly je potřeba nejdříve nařezat nožem či nůžkami.

Následující studie⁵⁴ zhodnocuje použitelnost Recyclebot extrudéru. Jako zkušební materiál byl použit plast HDPE. Drcení bylo prováděno pomocí klasického kancelářského skartovacího stroje. Byla hodnocena rozměrová neměnnost vlákna, spotřeba energie na metr vyrobeného vlákna a potřebný čas pro výrobu metru vlákna.

Rozměrová neměnnost výsledného vlákna je velice podstatná. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1, dodržení tolerovaných rozměrů je důležité pro kvalitu tisku. Rozměrová stálost byla měřena na 6 m úseku vlákna. Ten byl rozdělen na 60 částí dlouhých 0,1 m s tolerancí 0,003 m. Průměr vlákna pak byl měřen uprostřed každého vzorku pomocí mikrometru s přesností 0,003 mm. Měřena byla rovněž váha každého ze vzorků pomocí digitální váhy s přesností 0,0001 g.

Průměr vlákna se pohyboval v rozmezí 2,225 až 3,294 mm s tím, že průměrná hodnota dosáhla 2,805 mm. Průměrná hodnota váhy na délku vlákna pak dosahovala 0,564 g/100 mm vlákna.

Spotřeba energie byla měřena pomocí wattmetru s přesností 0,005 kWh. Spotřebovaná energie byla měřena pro všechny fáze procesu, což zahrnovalo drcení, protlačování motorem a zahřívání. Měření bylo prováděno na délce vlákna 11,41 m s přesností 0,05 m. Výsledky jsou přehledně zapsány v tabulce 4.

Tab. 4 Spotřeba energie během procesu recyklace.⁵⁴

Typ procesu	Příkon [W]	Spotřeba energie na délku vlákna [kWh/m]	Procento energie na délku vlákna [%]
Drcení	128	0,0002	0,33
Pohon motoru	66	0,02	33,22
Zahřívání	75	0,04	66,45
Celkem	269	0,06	100

Čas potřebný pro výrobu vlákna se skládá z drcení, zahřívání a protlačování materiálu. Doba drcení materiálu byla zvolena empiricky pro 100 g materiálu. Zahřívání a protlačování bylo měřeno zvlášť z důvodu časové prodlevy, která vzniká zahříváním protlačovací hlavě a potřebou roztavení materiálu z předchozího použití. Čas protlačování je definován jako průměrný čas potřebný k výrobě jednoho metru vlákna. Časy byly měřeny na digitálních stopkách s přesností 0,01 s.

Celkové množství 2060 g plastu bylo rozdrceno během 211 min, což dává 10,27 min/100 g. 100g rozdrceného plastu by mělo vystačit na cca 17 m vlákna. Celková doba zahřívání při použití 15 V zdroje byla 25 min. Samotné protlačování nebylo konstantní, ale hodnota se v průměru pohybovala okolo 90 mm/min.

Výsledné vlákno bylo následně úspěšně použito v RepRap 3D tiskárně. Byla tak prokázána životaschopnost systému Recyclebot.

Jako nejsnazší možnost pořízení takové sestavy se jeví nákup hotové sestavy, kterou je už následně jen nutné složit, což je, jak udávají prodejci, záležitostí 2 až 3 hodin. Ověřenou sestavou je projekt Filastruder⁵⁵, jenž lze pořídit v přepočtu za 6 000,-Kč. V tabulce 5 naleznete jeho vlastnosti udávané prodejcem.

Tab. 5 Základní vlastnosti Filastruderu.⁵⁵

Průměrná váha vyrobeného vlákna za 12 hodin	1 kg
Průměrná délka vyrobeného vlákna za minutu	38 mm
Průměrný příkon	50 W

Hlučnost	45 dBA
Cena	6 000,-Kč

Filastruder je možno použít pro výrobu vlákna jakéhokoliv průměru. Je možné v něm vyrábět všechny plasty zmiňované v této bakalářské práci v souvislosti s metodou FDM tisku. Nicméně 90 % testování bylo prováděno s plastem ABS, u něhož se prokázalo používání nejsnazší. Dosahovaná přesnost vlákna byla v rozmezí 0,05 mm. PLA je možno použít také, ale je důležité jej důkladně vysušit, což si vyžaduje náklady na další energii a práci. Filastruder je schopen vyrábět vlákno rovněž z již recyklovaných modelů. Podmínkou je vytvořit z nich kusy, které nepřesahují velikost 5 mm.⁵⁵

3.3 Ekonomické zhodnocení použití extrudéru

Z předchozích kapitol této bakalářské práce vyplývá, že tvorba nového vlákna plastu je možná. Nyní se zaměřím na ekonomickou smysluplnost tohoto procesu.

Jako zařízení pro výrobu vlákna bude pro výpočty použita komerčně prodávaná sestava Filastruder. Volba padla na tento systém z toho důvodu, že je tato sestava prověřena několika stovky uživatelů. Dalším důvodem je snadné sestavení pomocí přiloženého návodu. Cena 6 000,-Kč je vzhledem k přidané hodnotě v podobě návodu a celkové komplexnosti pro mě akceptovatelná.

Prodejci doporučují začít s výrobou vlákna z materiálu ABS, což se jeví jako nejsnazší způsob. Ve výpočtech bude tedy počítáno s tvorbou ABS vlákna. Vlákno bude vyráběno z čistých granulí ABS plastu a recyklovaných výtisků z ABS plastu. Dle kapitoly 2.1 je možno smíchat čisté granule a recyklované díly v poměru 80:20 aniž by jakkoliv utrpěly vlastnosti hotového modelu. Recyklované součásti budou muset být nejdříve rozdrceny drtičem. Tento postup tedy aplikujeme v ekonomickém výpočtu.

Celkové náklady na výrobu 1 kg vlákna:

$$N = M + E \quad [\text{Kč}] \quad (3.3)$$

Kde: M [Kč] – celkové náklady na materiál

E [Kč] – celkové náklady na energii

Materiál ve formě granulí ABS plastu je dle tabulky 3 možno pořídit v množstvích do 25 kg za cenu 60 Kč/kg. 20% materiálu bude recyklovaného z předchozích výtisků. Tento recyklovaný materiál bude v nákladu tedy 0,-Kč. Množství potřebného granulátu pro výrobu 1 kg vlákna je tedy 0,8 kg.

Celkové náklady na materiál pro 1 kg vlákna:

$$M = M_m \cdot J_c \quad [\text{Kč}] \quad (3.4)$$

Kde: M_m [kg] – celkové množství materiálu

J_c [Kč] – jednotková cena materiálu

$$M = 0,8 \cdot 60 = 48 \text{ Kč} \quad (3.4)$$

Náklady na spotřebovanou energii se skládají z el. energie potřebné pro rozdrčení recyklovaného materiálu, nákladů na energii spotřebovanou při zahřívání hlavně, kdy nedochází k výrobě vlákna a spotřebované energie na provoz Filastruderu.

Celkové náklady na spotřebovanou energii pro výrobu 1 kg vlákna:

$$E = d + z + f \quad [\text{Kč}] \quad (3.5)$$

Kde: d [Kč] – celkové náklady na spotřebovanou energii drtiče

z [Kč] – celkové náklady na spotřebovanou energii zahřívání

f [Kč] – celkové náklady na spotřebovanou energii Filastruderu

Pro výpočet nákladů drtiče použijí výsledky studie z tabulky 4. Jako drtič byl použit kancelářský skartovací stroj o příkonu 128 W. Potřebných 0,2 kg je možno dle této studie rozdrtit za dobu 20 min. Průměrná cena elektrické energie pro domácnosti je 4,5 Kč/kWh.⁵⁶

Celkové náklady na spotřebovanou energii drtiče, zahřívání a Filastruderu:

$$d, z, f = \left(\frac{p \cdot t}{1000} \right) \cdot s \quad [\text{Kč}] \quad (3.6)$$

Kde: p [W] – příkon

t [hod] – celkový čas chodu

s [Kč/kWh] – průměrná cena elektrické energie pro domácnosti v ČR

$$d = \left(\frac{128 \cdot 0,33}{1000} \right) \cdot 4,5 = 0,19 \text{ Kč} \quad (3.6)$$

Pro výpočet nákladů na spotřebovanou energii při zahřívání hlavně extruderu použijeme opět studii z kapitoly 3.2. Čas potřebný k zahřátí je 25 min. Příkon Filastruderu uvádí prodejce 50 W.

$$z = \left(\frac{50 \cdot 0,42}{1000} \right) \cdot 4,5 = 0,01 \text{ Kč} \quad (3.6)$$

Pro protlačení 1 kg vlákna je dle údajů prodejce potřeba, aby byl extrudér v chodu nepřetržitě 12 hodin. Průměrný příkon zařízení je 50 W.

$$f = \left(\frac{50 \cdot 12}{1000}\right) \cdot 4,5 = 2,7 \text{ Kč} \quad (3.6)$$

Celkové náklady na spotřebovanou energii pro výrobu 1 kg vlákna tedy vypočteme dle rovnice 3.5:

$$E = 0,19 + 0,01 + 2,7 = 2,9 \text{ Kč} \quad (3.5)$$

Celkové náklady na výrobu 1 kg vlákna pak spočítáme dosazením do rovnice 3.3:

$$N = 48 + 2,9 = 50,9 \text{ Kč} \quad (3.3)$$

Čas strávený pracovními úkony spojenými s výrobou vlákna je tvořen především časem stráveným u skartovacího zařízení. Na 1 kg vyrobeného vlákna je to 20 min. Dále je už potřeba zařízení pouze kontrolovat a průběžně případně přisypávat granulát. V praxi se dá toto vyřešit racionalizací práce – vícestrojovou obsluhou, což by náklady na čas strávený obsluhou zařízení minimalizovalo. Tato bakalářská práce se však zabývá výrobou vlákna v domácích a kancelářských podmínkách, což bylo zohledněno i v cenách materiálu a elektrické energie. Mzdové náklady tedy nebudou zohledňovány.

Jeden kilogram vlákna lze tedy vyrobit s celkovými náklady 50,9 Kč/kg. Kilogram hotového vlákna ABS lze zakoupit dle tab. 2 od 450 Kč/kg. Úspora tedy činí 399 Kč/kg (viz tab. 6).

Tab. 6 Úspora při recyklaci.

Cena vyrobeného vlákna extrudérem za kg	50,9 Kč
Cena běžně prodávaného vlákna za kg	450 Kč
Úspora	399 Kč

Pořizovací náklady činí 6 000,-Kč za pořízení Filastruderu, 900,-Kč činí poštovné do ČR a skartovací stroj používaný v testu lze zakoupit použitý za 1 000,-Kč. Celkové pořizovací náklady tedy činí 7 900,-Kč. Investice se nám tedy vrátí po vyrobení 20 kg vlákna ABS.

Budeme-li přemýšlet nad výhodností recyklace dříve vytisknutých dílů, musíme brát v potaz zvýšené nároky na čas strávený pracovními úkony. Přidání 20% recyklovaného materiálu nám sice sníží náklady na kg vlákna o cca 12 Kč, ale to za cenu 20 min strávených nad drcením recyklovaných dílů. Výhodnost recyklace v propočítaných domácích a kancelářských podmínkách je tedy diskutabilní. Tento problém by měl být dále řešen vývojem automatizovaného drtiče speciálně určeného pro toto použití. Klasický skartovací stroj se totiž prokazuje být neefektivním.

V případě, že nepožadujeme nejlepší možné vlastnosti materiálu nebo hodláme vytisknuté součásti recyklovat méně než 5 cyklů, což ukázaly výše zmíněné studie jako hranici pro zachování kvality materiálu ABS, jeví se recyklace z hlediska úspory nákladů velmi dobře.

Z výpočtů je tedy zřejmé, že podobné recyklační systémy mají zatím smysl zejména z hlediska tvorby vlákna z čistého granulátu. Díky těmto zařízením je možno podstatně redukovat náklady na materiál. Jestliže dojde k masivnějšímu rozšíření, můžeme předpokládat, že majitelé těchto extrudérů budou produkovat vlákno nejen pro své potřeby, ale začnou přebytky velmi levně nabízet i k prodeji. Tím se tak pravděpodobně nejen sníží poptávka po vláknech, ale dojde ke stačování cen směrem dolů. Celkově lze tedy hodnotit přínos extrudérů vlákna jako velmi pozitivní.

4 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo provést zhodnocení možností recyklace ve 3D tisku. Po rozboru základních technologií Rapid Prototypingu bylo zjištěno, že snadná recyklace již použitých nebo nepodařených výtisků do formy opět použitelného materiálu má svůj potenciál v podstatě jen u metody Fused Deposition Modeling. U ostatních metod recyklace nedává příliš smysl, jelikož by provedení přímo na pracovišti bylo velmi složité. Například recyklace výrobků zhotovených metodou Selective Laser Sintering a jejich následná přeměna zpět na prášek je v současné době v nedohlednu. U kovových prášků je toto navíc zcela nemožné, jelikož dochází k oxidaci a znehodnocení materiálu. U těchto metod se vyplácí pouze recyklace nespotřebovaného, přebytkového materiálu.

V další části se tedy práce zaměřuje na možnosti recyklace nepotřebných či nepovedených výtisků při metodě FDM. Nejprve bylo třeba stanovit, zda materiál při opakovaném recyklování nedegraduje. U nejčastěji používaných materiálu pro 3D tisk metodou FDM bylo zjištěno, že lze materiál recyklovat pouze s přimícháním čistého plastu. Opakovaným recyklováním pouze již vytisknutých dílů by docházelo ke zhoršování mechanických vlastností materiálu. Například u plastu ABS je tak doporučeno míchat recyklované díly v poměru 20 % na 80 % čistého plastu ABS. V takovém případě nedochází ani po šedesáti cyklech k degradaci materiálu. Na toto téma je vhodné provést další studie, aby se ještě zvýšila efektivita recyklace.

Na závěr bylo popsáno zařízení, které je schopno vytvářet z granulátu čistého plastu a recyklovaných výtisků vlákno materiálu použitelné pro opětovný tisk. Byl proveden ekonomický propočet, ve kterém vyšlo najevo, že lze na kilogramu materiálu určeného pro tisk ušetřit až 399 Kč, což značně snižuje cenu výtisků. Tato úspora je však zapříčiněna především velkým rozdílem v ceně nákupního materiálu v různých formách. Zatímco materiál ve formě vlákna je prodáván v případě plastu ABS od 450 Kč/kg, ve formě granulí je k sehnání už za cenu od 60 Kč/kg. Úspora tedy není zapříčiněna primárně recyklováním nepotřebných součástí. Recyklaci brání v současné době především absence zařízení, které by bylo schopno efektivně rozdrtit recyklovaný materiál ve formě modelů do formy granulí o velikosti menší než 5 mm, které jsou recyklační zařízení schopna zpracovat. V současnosti je totiž používáno velmi neefektivních zařízení, která k tomuto účelu nejsou vůbec určena.

Závěrem lze tedy říci, že recyklace plastů pro potřeby FDM tisku má smysl a ekonomicky se při použití v domácnostech a malých výrobních prostorách vyplácí. Ještě výhodnější bude po zefektivnění přípravy materiálu pro recyklační zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RepRap v2 Mendel. *En.wikipedia.org* [online]. 2009 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:RepRap_v2_Mendel.jpg
2. *Aditivní technologie - metody Rapid Prototyping*. VUT Brno. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
3. Stereolitografie. *Robo.hyperlink.cz* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main05.html>
4. HILLER, Jonathan D a Hod LIPSON. *Fully recyclable multi-material printing*. Cornell University, 2009. Dostupné z: <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2009/2009-10-Hiller.pdf>
5. TRÁVNÍČEK, Martin. Využití rapid prototyping technologií. *Cad.cz* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2715-vyuziti-rapid-prototyping-technologie.html>
6. Selective Laser Sintering. *Robo.hyperlink.cz* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main06.html>
7. COX, Brian David. *Selective laser sintering powder recycle system* [patent]. Patent, US 7887316 B2. Uděleno 2011. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US7887316>
8. STAMP, Jurgen. *3D-techniques in Materials Science* [online]. Vídeň, 2004 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://info.tuwien.ac.at/stampfl/publikationen/habil_mon.pdf
9. GORNET, T.J., K.R. DAVIS, T.L. STARR a K.M. MULLOY. Characterization of selective laser sintering materials to determine proces stability. In: [online]. Rapid Prototyping Center, J.B. Speed Engineering School, University of Louisville [cit. 3.5.2014]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF%202002%20Proceedings/2002%20SFF%20Papers/62-Gornet.pdf>
10. Laminated object manufacturing. *Robo.hyperlink.cz* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/>
11. Solid Ground Curing. *Slideplayer.us* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://slideplayer.us/slide/236104/>
12. Additive Manufacturing Technologies. NEW ZEALAND RAPID MANUFACTURING ASSOCIATION. *Ciri.org* [online]. 2011 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.ciri.org.nz/nzrma/technologies.html>
13. RepRap. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap>
14. Acrylonitrile butadiene styrene. In: *En.wikipedia.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene

15. ABS. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/ABS>
16. The difference between ABS and PLA in 3D printing. CHILSON, Luke. *Protoparadigm.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/blog/2013/01/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>
17. Price compare 3D printing materials: Filament. *3ders.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/pricecompare/>
18. ABS plastic grains. *En.wikipedia.org* [online]. 2009 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gr%C3%A3os_de_pl%C3%A1stico_ABS_%28ABS_plastic_grains%29.jpg
19. FEI, Ng Chin, Nik Mizamzul MEHAT a KAMARUDDIN. A Degradation Study of Virgin and Recycled ABS Blends Subjected to Multiple Processing. *International Journal of Research in Mechanical Engineering* [online]. 2013, roč. 1, č. 1, s. 93-102 [cit. 2014-05-03]. DOI: 2347-5188. Dostupné z: http://www.academia.edu/5728193/A_Degradation_Study_of_Virgin_and_Recycled_ABS_Blends_Subjected_to_Multiple_Processing
20. BAI, X., D.H. ISAAC a K. SMITH. Reprocessing Acrylonitrile-butadiene-styrene plastics: structure- property relationships. *Polymer Engineering Science* [online]. 2007, č. 47 [cit. 2014-05-03]. DOI: 120-130. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.20681/pdf>
21. PÉREZ, J.M., J.L. VILAS, J.M. LAZA, S. ARNÁIZ, F. MIJANGOS, E. BILBAO a L.M. LEÓN. Effect of reprocessing and accelerated weathering on ABS properties. *Journal of Polymer and the Environmental*. 2010, č. 18, s. 71-78.
22. SALARI, D. a H. RANJBAR. Study on the recycling of ABS resins: simulation of reprocessing and thermo-oxidation. *Iranian Polymer Journal*. 2008, č. 17, s. 599-610.
23. KARAHALIOU, E.K. a P.A. TARANTILI. Stability of ABS compounds subjected to repeated cycles of extrusion processing. *Polymer Engineering Science*. 2009, s. 2269-2275.
24. LIANG, R. a R.K. GUPTA. The effect of residual impurities on the rheological and mechanical properties of engineering polymers separated from mixed plastics. *SPE ANTEC Technical Papers*. 2001, s. 2753-2757.
25. PLA. *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>
26. PLA vs ABS printing. *Aboutinfor.blogspot.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://aboutinfor.blogspot.cz/2014/01/pla-vs-abs-printing.html>
27. MARTENS, BOS, KLAUS, BLEIJERVELD a MEER. *Perpetual plastic project* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.perpetualplasticproject.com/>
28. High-density polyethylene. *En.wikipedia.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/High-density_polyethylene

29. HDPE. In: *Reprap.org* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/HDPE>
30. ABS HDPE blend. In: *Reprap.org* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/ABS_HDPE_blend
31. CHARIYACHOTILERT, S., N. KOUDOMRUT a W. RITTISITH. Properties of Recycled Plastics from HDPE Drinking Water Bottles. *Kasetsart*. [online]. 2007, č. 40, s. 166-171 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://kasetsartjournal.ku.ac.th/kuj_files/2008/A080403111155.pdf
32. Polycarbonate. In: *Reprap.org* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Polycarbonate>
33. PC: Build strong parts in engineering thermoplastic. STRATASYS. *Stratasys.com* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/pc>
34. Using polycarbonate filament with a RepRap. *Hackaday.soup.io* [online]. 2011 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://hackaday.soup.io/tag/filament>
35. Printing polycarbonate. ENGLISH, Alex. *Protoparadigm.com* [online]. 2011 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/blog/2011/12/printing-polycarbonate/>
36. LIANG, R. a R.K. GUPTA. Rheological properties of recycled polycarbonate and abs melts Rheology. In: *Proc. XIII Int. Congress on Rheology* [online]. 2000 [cit. 3.5.2014]. Dostupné z: <http://www2.cemr.wvu.edu/~rliang/campost.pdf>
37. Glossary/cs. *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Glossary/cs>
38. Filler Materials: Fillers. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/FillerMaterials>
39. Wood filament LAYWOO-D3 suppliers and price compare. *3ders.org* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130204-wood-filament-laywoo-d3-suppliers-and-price-compare.html>
40. Review: what materials can be 3D printed?: What materials to 3D-print. FRANCOIS, Jeremie. *3D printer improvements* [online]. 2012 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.tridimake.com/2012/12/3d-printing-plastic-filaments-kinds-and.html>
41. Carbon Fiber reinforced filament. *Toybuilderlabs.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://toybuilderlabs.com/blog/2013/11/8/carbon-fiber-reinforced-filament>
42. Laybrick. *Extrudable.me* [online]. 2012 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.extrudable.me/wp-content/gallery/laybrick/laybrick-9.jpg>
43. Laybrick: a new rough 3D printer filament for a sandstone effect. *3ders.org* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130527-laybrick-a-new-rough-3d-printer-filament-near-zero-warp.html>

44. ENGLISH, Alex. 3D printing filament buyer's guide. *Protoparadigm.com* [online]. 2012 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/blog/2012/06/3d-printer-filament-buyers-guide/>
45. ENGLISH, Alex. 3D printer filament. *Protoparadigm.com* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/products/3d-printer-filament/>
46. Filament and pellets. *Filabot.com* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.filabot.com/collections/frontpage/colorant>
47. Filabot. *Filabot* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.filabot.com/>
48. Lyman filament extruder v3. *Thingiverse.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:145500>
49. Recyclebot. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Recyclebot>
50. MakiBox. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/MakiBox>
51. Web4Deb extruder. In: *Reprap.org* [online]. 2012 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Web4Deb_extruder
52. Waste Plastic Extruder prototype. In: *Reprap.org* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:WastePlasticExtruder_prototype.jpg
53. BRAANKER, G.B., J.E.P. DUWEL, J.J. FLOHIL a G.E. TOKAYA. *Developing a plastics recycling add-on for the RepRap 3D printer*. Delft. Dostupné z: <http://reprapdelft.files.wordpress.com/2010/04/reprap-granule-extruder-tudelft1.pdf>. Delft University of Technology.
54. BAECHLER, C., M. DEVUONO a J. PEARCE. Distributed Recycling of Waste Polymer into RepRap Feedstock. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2013, č. 19, s. 118-125 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.academia.edu/2643418/Distributed_Recycling_of_Waste_Polymer_into_RepRap_Feedstock
55. Filastruder. *Filastruder* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>
56. Cena elektřiny za kWh. *Finmarket.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.finmarket.cz/cena-elektriny-za-kwh/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	tří rozměrný
ABS	[-]	Acrylonitrile Butadiene Styrene
CO ₂	[-]	oxid uhličitý
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
HDPE	[-]	High Density Polyethylene
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
PC	[-]	polykarbonát
PE	[-]	Polyethylen
PLA	[-]	Polyactic acid
PP	[-]	Polypropylen
SGC	[-]	Solid Ground Curing
SLA	[-]	Stereolitografie
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
UV	[-]	ultrafialové záření
např.	[-]	například
obr.	[-]	obrázek
tab.	[-]	tabulka

Symbol	Jednotka	Popis
E	[Kč]	celkové náklady na energii
J _c	[Kč]	jednotková cena materiálu
M	[Kč]	celkové náklady na materiál
M _m	[kg]	celkové množství materiálu
N	[Kč]	celkové náklady na výrobu
d	[Kč]	náklady na spotřebovanou energii drtiče
f	[Kč]	náklady na spotřebovanou energii Filastruderu

p	[W]	příkon
s	[kW/h]	průměrná cena elektrické energie
t	[hod]	celkový čas chodu
z	[Kč]	náklady na spotřebovanou energii zahřívání

